

Recenzja Rozprawy doktorskiej mgr inż. Emilii Prószyńskiej - Karbownik pt.

**„Analiza promieniowania generowanego przez kwantowe lasery kaskadowe w paśmie średniej podczerwieni”**

Profil emitowanej wiązki jest jedną z podstawowych, ważnych z punktu widzenia użytkowników charakterystyk laserów. Dlatego bardzo szeroka jest oferta komercyjnego sprzętu pomiarowego do analizy wiązki, dotycząca prawie wyłącznie wiązek mało rozbieżnych, charakterystycznych dla laserów o dużej (w stosunku do długości fali) powierzchni emitującej, jak lasery na ciele stałym, gazowe, włóknowe, ekscimerowe. Dla laserów półprzewodnikowych, których znaczenie techniczne i udział w rynku są przecież coraz większe, taka oferta jest bardzo ograniczona. Wynika to chyba z charakteru wiązki emitowanej przez te przyrządy (duża rozbieżność, bardzo daleki od kołowego przekrój poprzeczny jako efekt bardzo małej powierzchni emitującej w formie szczeliny), wymagającej innej techniki pomiaru niż w przypadku wcześniej wymienionych typów laserów oraz z zakresu zastosowań (układy pompowe, sprzężenie ze światłowodem), gdzie jakość wiązki nie jest tak starannie optymalizowana. Jednak w zastosowaniach do emisji w wolnej przestrzeni, jak w przypadku laserów z kaskadą kwantową (QCL) na zakres średniej podczerwieni, np. do detekcji gazów, problem jakości wiązki zaczyna być ważny, choćby dla optymalizacji układów kolimujących. W QCL, gdzie powierzchnia emitująca jest relatywnie jeszcze mniejsza (w stosunku do długości fali), co skutkuje jeszcze większymi rozbieżnościami, charakterystyka wiązki wymaga specjalnych rozwiązań. Dodatkowym problemem są ograniczenia w konstrukcji i dostępności detektorów na pasmo ok. 10  $\mu\text{m}$ . To było przyczyną budowy w Zakładzie Fotoniki ITE oryginalnego układu goniometrycznego o dużej rozdzielczości do pomiaru charakterystyk kątowych laserów, w tym QCL, ze specyficznymi rozwiązaniami na zakres średniej podczerwieni. **Opracowanie metodyki pomiarów charakterystyk promieniowania QCL w oparciu o oryginalnie napisane oprogramowanie dla tego goniometru jest przedmiotem rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Emilii Pruszyńskiej-Karbownik.**

W częściach wstępnych rozprawy (Rozdz. 1) wskazany został cel pracy: **opracowanie metod badania wysoko rozbieżnych wiązek promieniowania laserów emitujących w zakresie średniej podczerwieni, w szczególności laserów QCL wytwarzanych w ITE.** Opracowanie obejmuje pomiary rozbieżności wiązki i parametru  $M^2$ , analizę niestabilności i zmian geometrii wiązki w czasie trwania impulsu zasilającego oraz określenie polaryzacji poszczególnych modów promieniowania.

**Przedstawioną we wstępie tezę jest, że szerokokątny profilometr goniometryczny jest uniwersalnym narzędziem do badania szeregu własności wiązki promieniowania generowanego przez lasery kaskadowe w zakresie średniej podczerwieni.** Wydaje się, że można tę tezę rozszerzyć na wszystkie półprzewodnikowe emityery promieniowania o dużej rozbieżności wiązki i szeroki zakres długości fali.

**Wskazany też został bezpośredni, osobisty i oryginalny wkład Autorki w opisanych w rozprawie badaniach (rozdz. 6 oraz 7 - 11).**

Wymienione zostały źródła finansowania projektów badawczych, których efektem jest przedstawiona Praca.

Rozprawa przedstawiona została w dziewięciu zasadniczych rozdziałach (poza wstępem i podsumowaniem) na 133 stronach. Bibliografia zawiera 101 publikacji, od fundamentalnych do najnowszych, obejmuje też niektóre publikacje powstałe w Zakładzie Fotoniki ITE. Spis publikacji powstałych w związku z pracą zawiera 16 pozycji, w których Doktorantka jest współautorem, w tym w dwunastu jest pierwszym autorem. Są to w większości materiały z konferencji międzynarodowych i krajowych oraz artykuły, w tym 2 w pismach z listy filadelfijskiej.

Rozdział 2 opisuje elementy teorii elektromagnetycznej będące podstawą do dalszych rozważań: Równania Maxwella, Zasadę Huygensa, przybliżenia (przyosiowe) Fresnela i Fraunhofera stosowane w opisie wiązek promieniowania z powodu nierozwiązalności analitycznej ogólnej postaci wynikającej z Zasady Huygensa. Jest to bardzo ciekawy fragment pracy, zwracający uwagę na szereg kolejnych przybliżeń umożliwiających znalezienie formuł analitycznych, których stosowalność jest ograniczona z powodu tych przybliżeń. W szczególności formuły bazujące na przybliżeniach przyosiowych nie powinny być stosowane dla laserów półprzewodnikowych i QCL, a jednak są stosowane z całkiem dobrą zgodnością z wynikami pomiarowymi. Często w praktyce w rozważaniu zależności pomiędzy rozkładami w strefie bliskiej i w strefie dalekiej posługujemy się przybliżeniem Fraunhofera ('F-



transformacja') nie pamiętając o stojących za nim założeniach. Lektura tej części pracy jest dość trudna, współrzędne  $x$ ,  $x_p$ ,  $y$ ,  $y_p$  wydają się być wprowadzone nie dość precyzyjnie, bardzo pomocny byłby tu rysunek.

W tym fragmencie Autorka w zdaniu „Rozkład pola  $u(\theta_x, \theta_y)$  wyrażony powyższym wzorem nazywany jest **połem dalekim**, w odróżnieniu od **poła bliskiego** na źródle  $u_0(x, y)$ ” (str. 8) wprowadza nieścisłość w terminologii, ciągnącą się przez cały dalszy ciąg pracy, choć nie w pełni konsekwentnie.

Następnie w rozdziale 2.4 opisano własności wiązek gaussowskich, jako klasy rozwiązań niemienniczych przy przejściu fali przez układ optyczny, a następnie m.in. opisano parametr  $M^2$  dla opisu rzeczywistych wiązek laserowych.

Rozdział 3 przedstawia zagadnienia promieniowania elektromagnetycznego w półprzewodnikach, w szczególności w falowodach laserów półprzewodnikowych.

W części 3.1 wprowadzone są parametry materiałowe umożliwiające uwzględnienie oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego (fali prowadzonej) z siecią krystaliczną (fononami) i z plazmą elektronową (plazmonami) wg modelu Drudego-Lorentza. Podano parametry tego modelu dla niektórych materiałów. Widać, że Autorka głęboko wniknęła w istotę rozważanych zagadnień; może to być ciekawe i pomocne dla wielu czytelników. Jednak i tu pojawiły się kłopoty terminologiczne: sformułowania: 'częstotliwość tłumienia fononów / plazmonów' (str. 16, po wzorze 3.5) są chyba dość nieodpowiednie – raczej powinny to być 'stałe' (współczynniki) tłumienia.

Podrozdział 3.2 zawiera krótki opis stosowanych w dalszej części rozprawy metod analitycznych i numerycznych: 2D- i 3D-obliczeń struktur falowodowych pasywnych i aktywnych/stratnych typowych dla konstrukcji laserów z emisją krawędziową, w tym QCL. W dalszej praktyce obliczeniowej Autorka stosuje metodę efektywnego współczynnika załamania i komercyjny program FIMMVAWE. Nie wszystko jest tu zrozumiałe, np., do czego potrzebne jest wprowadzenie kilku współistniejących modów o tej samej długości fali z przesunięciem fazowym  $\phi_j$  (wzór 3.11). Jakie jest znaczenie tego przesunięcia fazowego? Czy jest to potrzebne do opisu niestabilności wiązek?

**Podrozdział 3.3 prezentuje opracowaną przez Autorkę Metodę Analizy Odwrotnej (MAO) rozkładów przestrzennych promieniowania. Jest to jeden z kluczowych fragmentów, rzutujący na dalszy ciąg pracy.** Przedstawiona jest numeryczna metoda wyliczania (znajdowania) rozkładów promieniowania w strefie bliskiej (NF) na podstawie znanych (np. eksperymentalnych) rozkładów FF (ponieważ analitycznie - jak opisuje Autorka powołując się na literaturę - jeśli można np. przez F-transformację wyliczyć rozkład FF ze znanego rozkładu NF, to transformacja odwrotna jest niemożliwa). MAO nie wymaga zastosowania przybliżenia przyosiowego, ponieważ obliczenia numeryczne bazują na formule wynikającej z Zasady Huygensa. Przedstawiano numeryczno-eksperymentalny i czysto numeryczny sposób weryfikacji MAO. W kolejnych podrozdziałach przeanalizowany został wpływ rozrzutu parametrów zastosowanej do odliczeń metody numerycznej i wpływ zamodelowanych numerycznie zaburzeń na wyniki analizy odwrotnej z punktu widzenia stabilności rozwiązań względem rozwiązania wyjściowego. Istotną konkluzją jest, że nie należy mnożyć zbędnych bytów (w tym przypadku ilości modów stosowanych do modelowania rozkładu NF). Nadal trudno zrozumiała (dla recenzenta) jest metoda wprowadzania kolejnych modów z przesunięciami fazowymi (może jest to tylko problem precyzji wyrażenia).

**Zaproponowana MAO- znajdowania rozkładu NF (wobec istotnych trudności pomiarowych) jest przekonywująca i może być skuteczna** w opinii recenzenta, jednak skuteczność wzrośnie, jeśli 'coś' na początku będzie wiadomo o poszukiwanym rozkładzie NF (co np. pozwoli ograniczyć ilość zakładanych do obliczeń modów bocznych).

W Rozdziale 4 omówione są metody pomiarów profilu i charakterystyk kątowych wiązki laserowej.

W podrozdziale 4.1 Autorka skrótowo omawia stosowane najczęściej techniki analizy wiązki laserowej, punktując ich wady i zalety. Najkorzystniej w tej charakteryzacji wypada metoda skanowania 2D z detektorem punktowym w układzie goniometrycznym. Pomiary wiązki promieniowania prezentowane w tej rozprawie wykonane zostały w takim układzie.

Zdaniem recenzenta: wbrew argumentom Autorki, zastosowanie matryc CCD ma wiele zalet, szczególnie po zastosowaniu oprogramowania korygującego niesferyczną powierzchnię detektora CCD. Jednak w pomiarach charakterystyk kątowych (a nie profilu wiązki, który przy wiązkach rozbieżnych jest mało reprezentatywny) zaletą metody goniometrycznej jest jej charakter 'zgodny z definicją'. Dodatkową istotną zaletą jest możliwość pomiaru laserów dużej mocy, z czym jest problem przy zastosowaniu komercyjnych kamer CCD. Istotną wadą z kolei jest niemożliwość pomiarów charakterystyk niestabilnych w czasie.

W podrozdziale 4.2 omówione zostały metody i problemy związane z wyznaczeniem szerokości i rozbieżności wiązki omówionymi poprzednio metodami (punktowa, szczelinowa, ostrzowa, meto-



da zmiennej apertury i metoda drugiego momentu). Istotna jest stosowalność tych metod do pomiaru praktycznie spotykanych wiązek nie-gaussowskich. Wg standardów ISO zalecana jest metoda szczelinowa, ostrzowa, metoda zmiennej apertury (tylko dla wiązek kołowych) i metoda drugiego momentu. Według Autorki, dwuwymiarowy pomiar rozkładu mocy w polu dalekim umożliwia wyznaczenie szerokości wiązki stosując dowolną z ww. metod poprzez 'proste' operacje numeryczne.

Opisane zostało też szeroko spotykane w literaturze i występujące w charakterystykach komercyjnych laserów pojęcie szerokości połówkowej (FWHM) oraz związek tego parametru z parametrami wiązki gaussowskiej.

Autorka wskazuje na problemy związane z charakteryzacją wiązek o dużej rozbieżności w stosunku do obowiązujących standardów, stworzonych dla wiązek mało rozbieżnych.

Podrozdział 4.3 opisuje sposoby wyznaczania parametru  $M^2$ . Z komercyjnym sprzętem do pomiaru  $M^2$  jest ten sam problem, co ze standardami: zastosowanie ich do pomiaru laserów półprzewodnikowych, w tym QCL, szczególnie w podczerwieni jest kłopotliwe i nie gwarantuje poprawnych wyników.

Autorka opisuje technikę pomiarów parametru  $M^2$  polegającą na wytworzeniu pomocniczego przewężenia przy użyciu soczewki oraz pomiarze szerokości wiązki w wybranych punktach względem przewężenia. Metody różnią się od siebie liczbą i położeniem punktów pomiarowych, czyli tzw. cięć. Dalej opisana jest teoria i technika pomiarów metodami od dwóch do pięciu cięć, przy czym aktualny standard ISO zaleca nawet znacznie większą ilość cięć. A następnie Autorka pokazuje, że w przypadku laserów półprzewodnikowych i QCL wytwarzanie przewężenia pomocniczego nie jest potrzebne, ponieważ jest ono 'definiowane' na przednim lustrze przez szczelinę emitującą heterostrukturowej. Jednak, szczególnie dla QCL w zakresie średniej IR opisane są trudności z wyznaczeniem rozkładu pola na lustrze (przewężeniu). Dlatego jakość wiązki tą metodą obliczano tylko w kierunku bocznym (lateralnym) dla rozkładu pola na lustrze (NF) wyznaczanego z rozkładu FF (jak rozumiem, z zastosowaniem MAO).

W podsumowaniu, bazując na szerokim rozeznaniu literaturowym, Autorka zaproponowała metodę pomiaru jakości wiązki promieniowania optymalną w zastosowaniu do przyrządów QCL emitujących w paśmie średniej IR.

Rozdział 5 zawiera syntetyczny opis laserów z kaskadą kwantową (QCL) i ich zastosowań.

Podrozdział 5.1 zawiera skrótowy rys historyczny rozwoju przyrządów w powiązaniu z rozszerzającym się zakresem emitowanej długości fali dla różnych konstrukcji QCL.

W podrozdziale 5.2 opisane są własności termiczne QCL, może trochę nieprecyzyjnie, ale wyjaśniające stosunkowo dużą niezależność długości fali emitowanej od temperatury oraz wysoką wartość parametru  $T_0$  w porównaniu z innymi laserami 'długofalowymi', mierzone w warunkach impulsowych (100 ns, 500 Hz). W części 5.3 skrótowo, ale interesująco przedstawiony jest obszar zastosowań QCL, głównie na zakres 9 – 10  $\mu\text{m}$ , w którym emitują QCL wytwarzane w ITE, ale także zastosowań QCL w zakresie fal krótszych.

W podrozdziale 5.4 opisane są osiągnięcia technologiczne ITE w zakresie QCL. Opisane zostały heterostrukturowe QCL, z których wykonano lasery będące przedmiotem badań w tej pracy: naprężone i dopasowane sieciowo heterostrukturowe arsenkowe na podłożu GaAs oraz dopasowana sieciowo heterostruktura arsenkowa na podłożu InP. Opisane są niektóre wyniki ich charakteryzacji. Dalej, dość precyzyjnie opisany jest processing struktur QCL i ich montaż. W niektórych przypadkach zastosowano pokrycia HR tylnych lusterek, nigdy nie stosowano pokryć LR przednich lusterek (?). Przedstawiona tu została jedna z zastosowanych technik montażu chipów 'zło do złota', polegająca na ultrakompresyjnym 'zacieraniu' powierzchni podkładki montażowej (dopasowującej CTE) i chipa. Jest to zapewne poza zakresem tego opracowania, ale metoda ta wydaje się mocno inwazyjna. Niezależnie od tych uwag, widać, że Autorka dokładnie orientuje się w technologii, co potem rzutuje na organizację i przebieg pomiarów przyrządów.

Tabela 5.5 zawiera wykaz podstawowych informacji o przyrządach (QCL) wybranych do badań tej pracy.

Rozdział 6 zawiera opis i parametry techniczne goniometrycznego układu pomiarowego skonstruowanego w Zakładzie Fotoniki. Autorka ma udział w konstrukcji tego układu i jest autorem jego oprogramowania do sterowania eksperymentami i do akwizycji danych.

W części 6.1 opisana jest budowa i sposób działania goniometru, a także wynikające z jego konstrukcji możliwości pomiarowe, jak kątowny zakres pomiaru i rozdzielczość kątowna. Możliwości pomiaru z rozdzielczością czasową opisane są w części 6.1.1 dość mało precyzyjnie.

W podrozdziale 6.2 Autorka analizuje wpływ możliwych błędów geometrycznych układu pomiarowego na wynik pomiaru charakterystyk kątowych. Znaleziono są zależności umożliwiające skorygowanie błędnego pomiaru, gdy znane są te 'zaburzenia' geometryczne (jak dodatkowe okienka lub



filtry w układzie, przesunięcie chipa względem osi obrotu goniometru, itp.). Jednak raczej widać poszukiwanie rozwiązań gwarantujących eliminację tych błędów. W efekcie powstał kompletny układ pomiarowy wysokiej klasy.

W dalszym ciągu, w podrozdziale 6.3 opisane jest oprogramowanie do sterowania układu pomiarowego i akwizycji danych opracowane przez Autorkę w środowisku LabView. Jest ono dość uniwersalne – umożliwiające wyznaczenie rozbieżności badanej wiązki, całkowitej mocy w niej zawartej oraz pozostałych podstawowych parametrów wiązki. Opracowany został spójny system analizy danych doświadczalnych umożliwiający porównanie poszczególnych wyników pomiędzy sobą oraz z modelem numerycznym.

Pliki FF otrzymane w wyniku pomiarów stosowane były dalej do obliczania rozkładów NF metodą analizy odwrotnej.

Część 6.4 zawiera analizę błędów pomiarowych, innych niż wynikających z geometrii układu – bardziej przypadkowych, jak tło (promieniowanie termiczne), fluktuacje zasilania, drgania mechaniczne, wpływ okienka komory próżniowej (był analizowany wcześniej w części 6.2.1, zatem teraz wprowadza pewne zamieszanie). Te źródła wprowadzają tylko niewielkie błędy pomiaru FF, rzędu 2 – 5 %.

W podrozdziale 6.5 omawiane są zagadnienia dotyczące czasu pomiaru charakterystyki FF. W układach goniometrycznych jest on z natury długi, jednak Autorka zaznacza, że z punktu widzenia niezawodności QCL nie stanowi to problemu. Całkowity czas pomiaru zależy od założonej ilości punktów pomiarowych (od 1 do  $1E4$ ) oraz od parametrów układu goniometrycznego (jak czas pojedynczego odczytu mocy optycznej, czas przesuwu ramienia, czas mechanicznej stabilizacji po przesuwie, ilość powtórzeń pomiaru w celu eliminacji szumów) i zawiera się w zakresie od kilkudziesięciu sekund do ponad 100 godzin. Odpowiednio zaprojektowana seria pomiarów pozwoliła ustalić 'czasy własne' układu: czas pojedynczego odczytu mocy – ok. 0.3 s oraz czas mechanicznego przesuwu – ok. 0.9 s, przy czym założono czas stabilizacji 1 s. Z praktycznego punktu widzenia, jest to przyczyną do kompletnej dokumentacji technicznej detektora goniometrycznego.

W Rozdziale 7 Autorka przedstawia swoje wyniki pomiarowe dla serii QCL wykonanych z trzech procesów epitaksjalnych różniących się składami studni kwantowych InGaAs, na podłożach GaAs i InP. Z pierwotnie zmierzonych dwuwymiarowych (2D) charakterystyk kątowych Autorka wyznacza rozkłady jednowymiarowe (1D) analogiczne do otrzymywanych metodą przesuwającej się szczeliny i ostrza. Przedstawione są argumenty (najlepsze dopasowanie do założeń przybliżenia  $n_{eff}$ , możliwość wykorzystania do MAO i do wyznaczania innych parametrów wiązki), dla których stosowane do dalszych analiz rozkłady 1D będą wyliczane metodą 'sumowania po szczelinie'.

Zmierzone rozkłady 2D są często nieregularne (o wielu maksimach), choć są też regularne - w przybliżeniu gaussowskie w obu kierunkach. Ogólnie, węższe paski i dłuższe rezonatory dają mniej rozbieżne i bardziej regularne rozkłady FF. Duże znaczenie ma montaż, w wyniku którego profil wiązki może bardzo się zmienić – z powodu naprężeń, błędów pozycjonowania, ewentualnych przesłonięć lutem (tak chyba jest w przyrządach na Rys. 7.14 i 7.15, gdzie widać prążki interferencyjne) lub krawędzią okienka kriostatu (Rys. 7.16, 7.18). W przypadku montażu 'epi-up' wpływ błędów pozycjonowania i lutowania maleje (opisane to jest w rozprawie w części 10.2), jednak pozostają naprężenia. W szczególności dotyczy to montażu metodą 'ultra-kompresyjną' ('złoto do złota'). W efekcie, w pracy charakteryzowany jest łączny efekt własności QCL i montażu. Dla charakteryzacji samych QCL bardziej jednoznaczne wyniki (szczególnie przy zasilaniu krótkimi impulsami) uzyskane byłyby przy prostym pomiarze w zaciskach lub pod sondą. Konstruktywne byłoby też porównywanie charakterystyk FF zmierzonych przed i po montażu. Wtedy przyrządy źle zmontowane można by odrzucić. Pomocna byłaby nawet wstępna inspekcja mikroskopowa. Z drugiej strony, Autorka udowodniła, że jeśli celem jest analiza wiązki, to układ pomiarowy może zarejestrować, a potem można zanalizować każdą wiązkę.

W podrozdziale 7.2 opisane jest wyznaczanie rozbieżności wiązki ze zmierzonych rozkładów FF (2D) opisanymi wcześniej pięcioma metodami. Dla rozkładów nieregularnych te metody dają niezgodne wyniki. Dlatego Autorka zastosowała 'test numeryczny' bazując na znanych, zgodnych z projektami heterostruktur rozkładami współczynnika załamania, dla których wyliczono rozkłady NF i FF z zastosowaniem programu FIMMWAVE. Okazało się, że w funkcji malejącego zakresu kąтового pomiaru (zakres ten wynosi  $\pm 45^\circ$  dla zbudowanego układu goniometrycznego), zgodna z wynikami numerycznym i najbardziej niezależna od ograniczenia zakresu kąтового pomiaru jest metoda charakteryzowania rozbieżności poprzez szerokość połówkową (FWHM). Ta metoda została zastosowana w oprogramowaniu goniometru.

W podrozdziale 7.3 przedstawione zostały z kolei wyniki pomiarów parametru  $M^2$  wiązki w układach opisanych w części 4.3 – z przewężeniem pomocniczym (1) i z przewężeniem pierwotnym (2 - na lustrze lasera). Porównanie obu grup wyników (bardzo duży rozrzut w układzie (1)) i wyników literaturowych dla QCL o podobnej konstrukcji doprowadziło Autorkę do wniosku, że wyniki rejestro-



wane w układzie (1) są 'niefizyczne'. Autorka bardzo szczegółowo przeanalizowała przyczyny tkwiące w układzie pomiarowym i w konkluzji, w dalszych pracach stosowany jest układ i metoda (2) z przełączeniem pierwotnym, co zresztą, według informacji literaturowych, jest na ogół stosowane w analizie wiązki laserów półprzewodnikowych. W QCL dodatkowym argumentem na rzecz tej decyzji jest mały astygmatyzm. Zmierzone tą metodą wartości  $M^2$  zawierały się w zakresie 1.2 – 6, w ogólnej zgodności z wynikami literaturowymi dla QCL pracujących na podstawowym modzie bocznym. Zauważony został wzrost  $M^2$  ze wzrostem szerokości paska aktywnego (z powodu rosnącego udziału wyższych modów bocznych). Wskazano też lepszą jakość wiązki laserów otrzymanych na podłożach GaAs w porównaniu z tymi na podłożach InP. Nie są omawiane przyrządy QCL z nieregularnymi rozkładami wiązki, gdzie wartość  $M^2$  byłaby niemierzalna (zresztą słusznie, ponieważ nie dotyczyłaby laserów, tylko montażu).

W Rozdziale 8 omówione są zagadnienia czasowych fluktuacji mocy i 'przebudowywania się' charakterystyk kierunkowych (reorientacji wiązki) QCL. Efekt reorientacji wiązki obserwowany jest w czasie pracy lasera – w trakcie trwania impulsu – w funkcji uwarunkowań zewnętrznych (jak poziomysterowania, temperatura). Możliwość kontroli tego efektu byłaby ważna aplikacyjnie. Z drugiej strony, niekontrolowana reorientacja w trakcie trwania impulsu laserowego jest poważnym problemem, dlatego prowadzone są prace w kierunku minimalizacji tego efektu – stabilizacji wiązki.

W podrozdziale 8.2.1 i 8.2.2 reorientacja opisana jest teoretycznie jako efekt superpozycji dwóch sąsiednich modów najniższych rzędów, przesuniętych w fazie. Przesunięcie kątowe maksimum wiązki (reorientacja) jest wtedy funkcją stosunku amplitud tych modów i wzajemnego przesunięcia fazowego. Wielkości te zastosowano jako parametry dopasowania dla analizy odwrotnej do zmierzonych przebiegów (FF) reorientacji w czasie. W rozwiązaniu stacjonarnym rozkłady modów są jednoznacznie określone (wzór 3.10, choć nie wiadomo, co Autorka 'ukrywa' we współczynniku  $u_{ko}$ ). Zatem wprowadzenie parametru przesunięcia fazowego reprezentuje (zdaniem recenzenta) raczej efekty niestabilności rozkładu pola w rezonatorze powodowane filamentacją (?).

Część 8.2.4 przedstawia wyniki pomiarowe QCL, dla których zarejestrowano wyraźną reorientację. Jest to kolejna ważna część tej pracy. Dwuwymiarowe mapowanie rozkładu FF z rozdzielczością czasową (sposób pomiaru z nanosekundową rozdzielczością czasową został wcześniej skrótowo opisany) tworzy 'plik pomiarowy', który można 'rozkodować' i otrzymać przedstawione charakterystyki QCL, jak czasowa ewolucja kąтового położenia maksimum wiązki (jako miary reorientacji), 2D-rozkłady kątowe wiązki w kolejnych momentach w czasie trwania impulsu lub, z zastosowaniem analizy odwrotnej, można wyznaczyć czasową ewolucję modów bocznych fali prowadzonej i ich relacji fazowej (w ramach przyjętego modelu). **W sumie, widać, że powstał bardzo uniwersalny i sprawny system akwizycji i obróbki wyników pomiarowych umożliwiający szeroką charakteryzację laserów półprzewodnikowych o skomplikowanych, zmiennych w czasie profilach silnie rozbieżnej wiązki.** Trzeba zaznaczyć, że metoda jest skuteczna, gdy ewolucja wiązki (reorientacja) w czasie trwania impulsu ma charakter stacjonarny.

Podrozdział 8.3 jest kontynuacją - uwzględniony został wpływ wyższych modów bocznych (praktycznie 0 - 2) przy wyznaczaniu charakterystyk kierunkowych i reorientacji wiązki na przykładzie lasera z wiązką zawierającą dwa dominujące asymetryczne maksima boczne.

Rozdział 9 opisuje badania polaryzacyjne QCL wytworzonych w ITE. Teoretyczna część 9.1 zawiera przeprowadzony przez Autorkę dowód na bazie półklasycznej teorii promieniowania, że w strukturach QCL z przejściami kwantowymi w jednym paśmie preferowana jest polaryzacja TM. Jednak dalej wskazane są przybliżenia przyjęte w tych rozważaniach, których konsekwencją jest pewna mała zawartość polaryzacji TE w promieniowaniu. W części 9.2 przeprowadzona jest analiza przyczyn obecności polaryzacji TE - głównie skończonej szerokości paska aktywnego i nieprostokątnego profilu 'dwukanałowej mesy' definiującej ten pasek. Taki profil prowadzi w modelowaniu numerycznym do wzbudzenia modów hybrydowych.

W podrozdziale 9.3 przedstawione są wyniki pomiarowe rozkładów FF wybranych QCL z zastosowaniem polaryzatora. Potwierdzają one przewidywaną teoretycznie resztkową zawartość polaryzacji TE, zawartą na ogół w modach bocznych powyżej podstawowego. Zastosowanie analizy odwrotnej pozwala przynajmniej w przybliżeniu (chyba nie zawsze (?)) określić, z którym modem związana jest polaryzacja TE. Dla laserów z wysoką tzw. 'dwukanałową mesą' pomiary uprawdopodobniły wzbudzenie modów hybrydowych, zgodnie z oczekiwaniami teoretycznymi.

Zdaniem recenzenta - doświadczenia z diodami laserowymi wskazują, że montaż wpływa na stosunek TM/TE. W QCL też należałoby to sprawdzić, choć mechanizmy będą inne.

Przedstawione w Rozdziale 10 zagadnienia można potraktować jako uzupełnienia i wyjaśnienia. W części 10.2 Autorka analizuje błędy montażowe – zamodelowany został efekt ugięcia wiązki emitowanej przez chip cofnięty względem krawędzi bloku chłodzącego/montażowego (z zastosowa-



niem programu FIMMWAVE + FIMMPROP). Uzyskała wyniki zgodne z eksperymentalnymi. Wydaje się jednak (recenzentowi), że zamodelowano dość oczywisty efekt, i może raczej należało skierować energię na eliminację tych błędów – wybór próbek reprezentatywnych raczej dla konstrukcji QCL niż dla montażu. Może jest to jednak uwaga raczej do technologa, niż do Autorki, która udowodniła, że potrafi również takie problemy udokumentować i zinterpretować. Ten fragment mógłby znaleźć się w lub po części 7.1. Podrozdział 10.3 także wydaje się być uzupełnieniem do części 7.1. Przedstawione jednowymiarowe rozkłady FF w funkcji parametrów konstrukcyjnych QCL są zgodne z ogólną wiedzą na ten temat, podobnie jak konkluzja, że dostatecznie wąska mesa preferuje i stabilizuje mod podstawowy.

**W podsumowaniu, w rozprawie udowodniono sformułowaną na wstępie tezę o uniwersalności profilometru goniometrycznego jako narzędzia do badania wiązki promieniowania generowanego przez QCL na zakres średniej podczerwieni.** Ważną zaletą przyrządu zdaje się być przydatność do pomiarów laserów półprzewodnikowych dużej mocy (również CW), gdzie kamery CCD nie sprawdzają się.

Także cel rozprawy, którym było opracowanie wszechstronnej metody badania wysoko rozbieżnych wiązek laserów emitujących promieniowanie w zakresie średniej podczerwieni został osiągnięty. Opracowany został sprawny system akwizycji i obróbki wyników pomiarowych (z rozdzielczością czasową i polaryzacyjną) umożliwiający szeroką charakteryzację laserów półprzewodnikowych o skomplikowanych profilach wiązki. Praktycznym zastosowaniem tego systemu jest oprogramowanie profilometru.

Konsekwentne zastosowanie analizy odwrotnej do wyliczania rozkładów pola optycznego i ich ewolucji czasowych w światłowodzie QCL na podstawie zmierzonych charakterystyk kątowych i ich anomalii (FF) z rozdzielczością czasową jest jedną z głównych koncepcji tej pracy i jej istotną wartością.

Widać biegłość Autorki w tworzeniu procedur dla opracowania i interpretacji wyników pomiarowych oraz w projektowaniu eksperymentów numerycznych.

Układ pracy jest konsekwentny i wewnętrznie spójny, redakcja rozprawy jest staranna, napisana poprawnym językiem. Obszerne podpisy pod rysunkami są pomocne. Jednak Autorka wprowadziła pewną ilość terminów i sformułowań, z którymi trudno się zgodzić, jak np.:

termin 'irradiacja' w ciągu całej pracy – odpowiedni polski termin to promieniowanie, natężenie promieniowania, itp.,

Str. 47: 'praca w trybie fali ciągłej',

Str. 115 i 116 i inne: 'symetryczność i asymetryczność',

W ciągu całej pracy Autorka stosuje termin 'mody poprzeczne', mówiąc o kierunku lateralnym – w polskiej terminologii przyjęto termin 'mody boczne' dla tego kierunku.

W tekście jest bardzo dużo drobnych błędów – 'literówek', z których znaczna część była zapewne wykryta automatycznie, a nie zostały skorygowane.

Pomijając powyższe drobne mankamenty redakcyjne, Autorka niewątpliwie osiągnęła zadeklarowane cele pracy.

Stwierdzam, że recenzowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie Doktorantki do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

A. Maląg